

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15529

О. О. МІКОСЯНЧИК, В. В. ТОКАРУК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, С. М. ЗАНЬКО,
О. Ю. ЖОСАН

Національний авіаційний університет, Україна

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ І СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ

Проведено аналіз дифрактограм поверхневих шарів металу при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування. Розглянуто механізми зміцнення контактних поверхонь внаслідок їх структурної пристосованості при терті. Встановлено, що підвищення ступеня проковзування призводить до інтенсифікації дифузійних процесів, підвищення температури в зоні фрикційного контакту, зростання градієнту швидкості зсуву, забезпечуючи утворення карбідних та аустенітних фаз, аморфізацію приповерхневих шарів металу. Розглянуто вплив структурно-деформаційних змін в поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь на їх зносостійкість.

Ключові слова: деформаційне зміцнення, пластична деформація, аморфізація, проковзування, знос.

Вступ та постановка задач дослідження. Надійність та довговічність машин і механізмів пов'язана з питанням підвищення ресурсу їх деталей. В результаті накопичення в тонких поверхневих шарах пар тертя дефектів, поява яких обумовлена впливом навантажувальних, швидкісних і температурних факторів, а також мастильного матеріалу і режимів експлуатації, відбувається їх руйнування і зниження ресурсу. На сучасному етапі розвитку трибології ще недостатньо розроблені питання, що відображають мікромеханіку руйнування твердих тіл в парах тертя. Процеси накопичення і розвитку мікропошкоджень в результаті впливу циклічних навантажень за схемою «стиск – зсув» є важливою складовою питання щодо підвищення надійності трибосистеми. При циклічному навантаженні пар тертя відбувається повторення макропластичних зрушень в протилежних напрямках, що призводить до розрихлення, стирання і утворення «аморфного шару» по площинах ковзання. Це пов'язано з порушенням рівноваги внутрішньокристалічних зв'язків і початком утворення втомних мікротріщин.

В умовах контактного циклічного навантаження в тонкому поверхневому шарі елементів трибоспряжень руйнування контактних поверхонь пов'язано зі зміною структури матеріалів. Це відбувається при високих швидкостях, температурах, навантаженнях і інтенсивних деформаціях, сконцентрованих в локальних поверхневих і підповерхневих об'ємах матеріалу пар тертя. Високі температури в фрикційному контакті обумовлюють виникнення структурних і фазових перетворень. З огляду на те, що нагріті зони мають локальний характер, а швидкості нагрівання та охолодження контактних поверхонь в умовах локального приросту температури дуже високі, катастрофічного руйнування не відбувається. Для розвитку та прояву цих руйнівних процесів необхідний час для накопичення, концентрації та поширення зон руйнування. Напрямами, які потребують подальших досліджень, є визначення тривалості протікання процесів структурно – фазових перетворень, їх якісна оцінка, межі прояву їх змін та тривалості стабільності утворених структур до динамічних умов навантаження.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми. Домінуючим фактором, що визначає опір зношуванню деталей машин, є рівень міцності їх контактних поверхонь. У роботах Ф. Боудена, М.М. Хрушова та інших авторів було показано наявність пропорційної залежності між вихідною міцністю (твердістю) металевих матеріалів і їх опором щодо різних видів зношування [1, 2].

Однак, до теперішнього часу накопичений великий експериментальний матеріал, який показує, що між вихідною твердістю матеріалів і їх опором зношуванню в ряді випадків відсутній прямий зв'язок. Встановлено, що зносостійкість сталей і сплавів визначається не тільки їх вихідною міцністю, але і рівнем ефективної міцності їх поверхні, який досягається в процесі експлуатації [3].

Спільна дія нормальних і дотичних напружень в поверхневому шарі матеріалу при терті призводить до створення об'ємного напруженого стану. В таких умовах навіть високоміцнісні матеріали набувають достатню пластичність [4]. Однією з основних причин зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару при терті є нерівномірна пластична деформація. Частина енергії пластичної деформації витрачається на формування залишкових напружень, які обумовлені дією максимальних нормальних напружень на поверхні і максимальних дотичних напружень на деякій глибині.

Енергія, що поглинається при пластичній деформації, генерується в основному в напруженнях третього роду, які є наслідком порушення геометрії кристалічної ґратки. Значна частина напружень деформації ґратки зосереджена навколо дислокацій [5]. Дислокація оточена полем пружних напружень, яке взаємодіє з такими ж полями сусідніх дислокацій. Характер силового впливу на дану дислокацію від зовнішніх навантажень і від оточуючих дислокацій однаковий. Дислокація характеризується зміщенням атомів в ній самій; крім того, виникають пружні зміщення в правильній ґратці, яка оточує дислокацію. Відповідно до цього розподіляються і напруження. Іншим джерелом напружень третього роду, що охоплюють ділянки меншого, ніж у дислокацій, порядку, є атоми втілення.

Специфічною особливістю роботи матеріалів в вузлах тертя є підвищення кінетичної енергії атомів в поверхневих шарах контактуючих пар, розрив міжатомних зв'язків в результаті протікання процесів пружної і пластичної деформації. Зростання енергетичного потенціалу атомів, що проявляється в підвищенні температури поверхонь тертя, призводить до зміни фізико-механічних та інших характеристик, які були властиві матеріалу в початковому стані, і, крім того, активує ряд незворотних процесів [6].

Зародження і розвиток первинних зсувів в поверхневих шарах пар тертя, відповідно до сучасних уявлень фізичної мезомеханіки, обумовлено їх пониженою зсувною стійкістю і наявністю концентраторів напружень у вигляді мікронерівностей контактних поверхонь [7]. Ступінь деформації приповерхневих шарів і характер поширення деформації по глибині залежать від міцнісних властивостей, структури металу, наявності покриття та його адгезійної сили взаємодії з матеріалом основи [8].

Глибина поширення деформаційних процесів на ділянках фактичного контакту на початковій стадії фрикційної взаємодії знаходиться в діапазоні від сотих часток до декількох мікрметрів [9]. Деформаційне зміцнення, взаємодія і перекриття окремих ділянок пластичної течії можуть призводити до поширення деформацій на глибину до 10 – 100 мкм.

Встановлення механізмів утворення вторинних структур на поверхнях елементів трибоспряжень дозволяє керувати вибором оптимальних поєднань триботехнічних властивостей контактних поверхонь і мастильних матеріалів в залежності від умов експлуатації вузлів тертя, забезпечуючи умови їх сумісності. Важливе практичне значення має питання оптимізації структурних перетворень і процесів деформаційного зміцнення в металевих матеріалах при терті з метою досягнення якомога вищого рівня зміцнення поверхні, що буде сприяти підвищенню зносостійкості елементів трибоспряжень.

Мета роботи – визначення впливу структурно-фазових перетворень в поверхневих шарах сталі при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування на зносостійкість контактних поверхонь.

Методика проведення експерименту. Дослідження проводились на програмно-апаратному комплексі (ПАК) для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів [10]. ПАК представляє собою комплекс, до складу якого входить установка тертя (УТ), електронний блок (ЕБ), програмне забезпечення (ПЗ) «Тертя», встановлене на персональному комп'ютері (ПК) типу IBM PC. Програмний блок математичної обробки даних виконує обчислення за заданим алгоритмом розрахунку. В створеній програмі є окремий канал для візуальної оцінки кінетики зміни основних триботехнічних показників трибоконтакту в режимі on-line.

На програмно-апаратному комплексі за допомогою роликової аналогії моделюється робота зубчастих передач в умовах кочення з проковзуванням.

В якості зразків використовувалися ролики зі сталі 45 (HRC 38, Ra 0,35мкм). Змашування контактних поверхонь здійснювалося зануренням нижнього ролика в ванночку з оливою. В якості мастильного матеріалу використовувалась мінеральна трансмісійна олива для механічних коробок передач і головних передач легкових і вантажних автомобілів Okko GL-4 80w/90. Об'ємна температура оливи – 20°C.

Загальна кількість циклів в кожному експерименті склала 500. Максимальна частота обертів для випереджаючої поверхні становила 1000 об/хв. У роботі імітувалося проковзування 3, 20 і 40%. Максимальне контактне напруження по Герцу – 250 МПа.

Зразки після тертя досліджувалися рентгенівським методом. Рентгенівська зйомка проводилася на дифрактометрі ДРОН-3 в мідному Cu - K α випромінюванні з графітовим монохроматором. Зйомка велася в автоматичному режимі з кроковим переміщенням 0,1 градуса і часом експозиції в кожній точці 4 сек. Надалі проводилася комп'ютерна обробка отриманих цифрових даних.

Обговорення основних результатів. Аналіз дифрактограм поверхневих шарів сталі 45 в вихідному стані та після проведених експериментів в нестационарних умовах тертя свідчить про появу ряду дифракційних ефектів, що проявляються в різній ступені в залежності від величини проковзування досліджуваних контактних поверхонь.

На чистій поверхні вихідного зразка рентгенографічно спостерігається одна основна фаза - α -Fe (ферит), проявляється перша найсильніша лінія відбиття від площини (110). Карбід заліза не виявляється (рис. 1).

Дослідження поверхневого шару металу при терті в умовах кочення з мінімальним проковзуванням до 3% показало, що поряд з лінією відображення основної фази (α -Fe) з'являються слабкі лінії відображення, які можна віднести до

карбідної фази Fe_3C і до аустенітної з деяким вмістом вуглецю - $\text{Fe}_{1.86}\text{C}_{0.14}$ (рис. 2). Таким чином, в результаті тертя з досліджуваним мінімальним проковзуванням на поверхню тертя зразка виходить найбільш тверда фаза - карбідна. Перш за все, це обумовлено інтенсифікацією дифузійних процесів при терті.

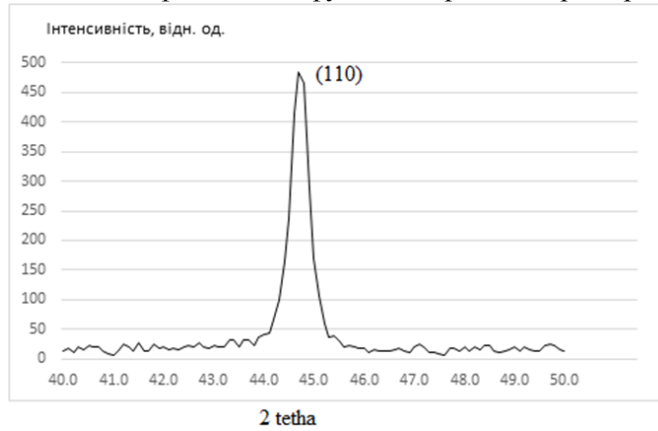


Рис. 1. Фрагмент дифрактограми загартованої сталі 45 в початковому стані

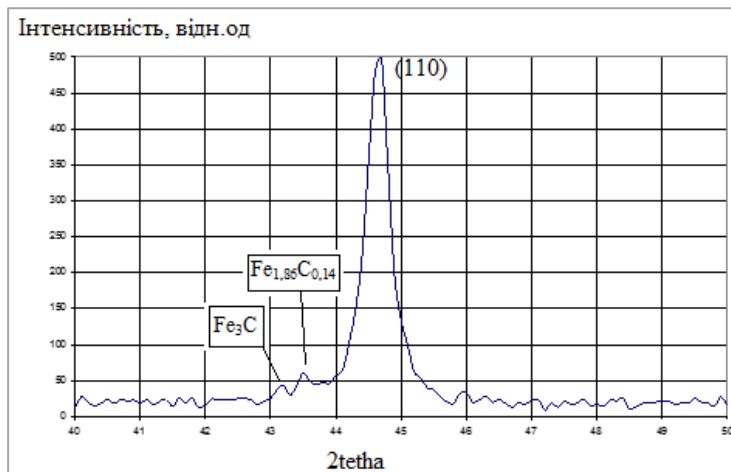


Рис. 2. Фрагмент дифрактограми сталі 45 при терті в умовах кочення з проковзуванням (3%)

На доріжці тертя контактних поверхонь, при роботі в умовах кочення з проковзуванням 20%, поряд з основною першою лінією фериту ($\alpha\text{-Fe}$), більш чітко виявляється лінія відображення, яку можна віднести до аустенітної ($\gamma\text{-Fe}$) (рис. 3). Можливість фазових перетворень при терті, до яких відноситься утворення аустеніту внаслідок вторинного загартовування, реалізується за умов, до яких можна віднести як локальний нагрів до температури вище критичної і охолодження до кімнатних температур з великою швидкістю на ділянках мікроконтакту, так і зниження критичних точок під дією деформацій. Утворення дрібнодисперсної структури при збільшенні ступеня проковзування внаслідок локалізації максимальних напружень зсуву в приповерхневих шарах металу також полегшує структурні перетворення - гомогенізацію аустеніту, розчинення і виділення карбідів, інтенсивну дифузію в мікрооб'ємах і т.д. [11]. При цьому лінії відображення ($\alpha\text{-Fe}$) зміщуються в бік малих кутів, що означає збільшення пері-

оду ґратки. Це обумовлено розчиненням в ній домішок впровадження (вуглецю, кисню, азоту).

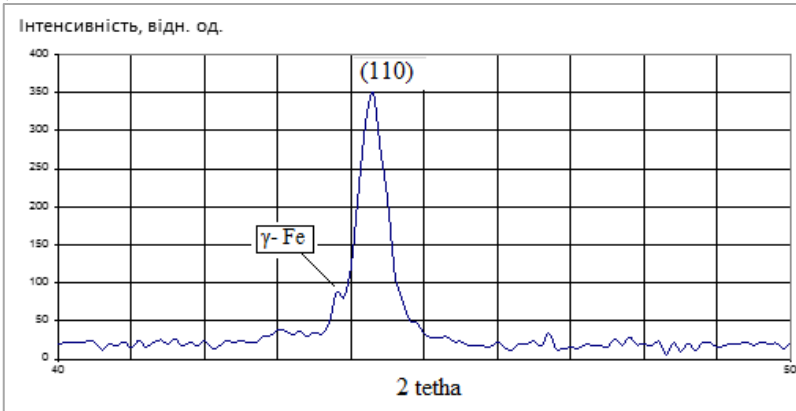


Рис. 3. Фрагмент дифрактограми сталі 45 при терті в умовах кочення з 20% -ним проковзуванням

С збільшенням ступеня проковзування до 40% інтенсифікуються дифузійні процеси, що сприяють насиченню фериту вуглецем, оскільки лінія відображення (110) продовжує зміщуватися в бік малих кутів. Видно вигин лінії (при $2\theta \approx 44^\circ$), який може бути обумовлений накладенням лінії аустеніту з додатково розчиненим вуглецем (рис.4). Проявляється також досить розмита і слабка лінія відображення (111) фази Fe_3C .

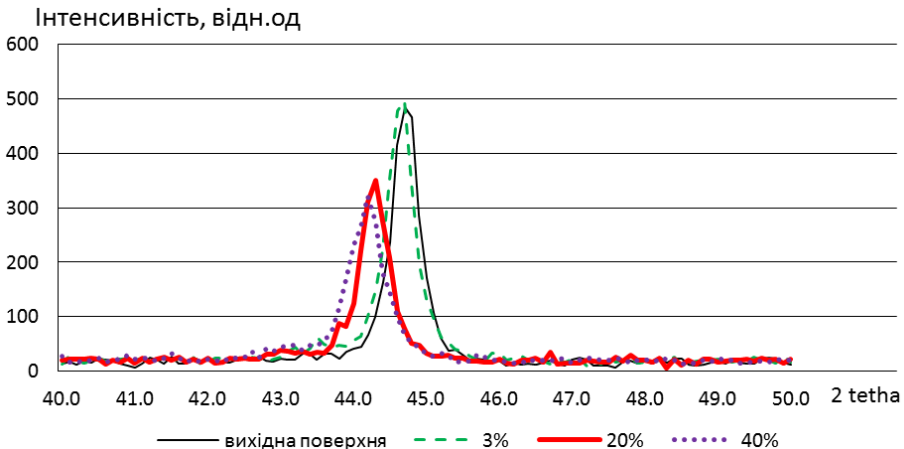


Рис.4. Фрагмент дифрактограм поверхневих шарів сталі 45 в умовах кочення з різним ступенем проковзування

Таким чином, в процесі тертя при збільшенні ступеня проковзування від 3 до 40%, внаслідок інтенсифікації пластичної деформації при збільшенні градієнта швидкості зсуву і підвищенні температури, відбувається дифузійний перерозподіл вуглецю в поверхневих шарах металу. На це вказує збільшення міжплощинних відстаней (періодів ґратки) феритної фази, через що лінія відображення зміщується в бік малих кутів.

Аналіз співвідношення інтенсивностей рефлексів (110) і (200) фериту I_{200}/I_{110} вказує на незначну зміну переважної орієнтації зерен в поверхневому шарі зразків після випробувань з різним відсотком проковзування. Так, в порівнянні з випробуваннями без проковзування, після яких I_{200}/I_{110} становить 0,073,

відношення інтенсивностей I_{200}/I_{110} після випробувань зразків в умовах кочення з проковзуванням змінюється в межах 0,081-0,092, вказуючи на появу більшої кількості зерен з орієнтацією площин (200) паралельно поверхні внаслідок деформаційних процесів.

Як відомо [12, 13], пластична деформація матеріалів призводить до значного збільшення щільності таких дефектів, як дислокації (або їх скупчення), дефекти упаковки, вакансії (або їх комплекси), міжвузлові атоми і т.д. Поля спотворень цих дефектів кристалічної будови обумовлюють зміщення атомів з вузлів, що призводить до пружних мікродеформацій. Якщо розмір блоків досить малий ($\sim 10^{-6}$ см), це призводить до помітного розширення дифракційних піків на дифрактограмі. Наявність в полікристалічному зразку мікроспотворень також призводить до розширення піків на дифрактограмі. Найчастіше існує однозначний зв'язок між величиною мікродеформацій і щільністю хаотично розподілених дислокацій.

При аналізі дифрактограм досліджуваних зразків встановлено підвищення лінії фону в області малих кутів, що свідчить про аморфізацію приповерхневих шарів металу при терті (рис. 5).

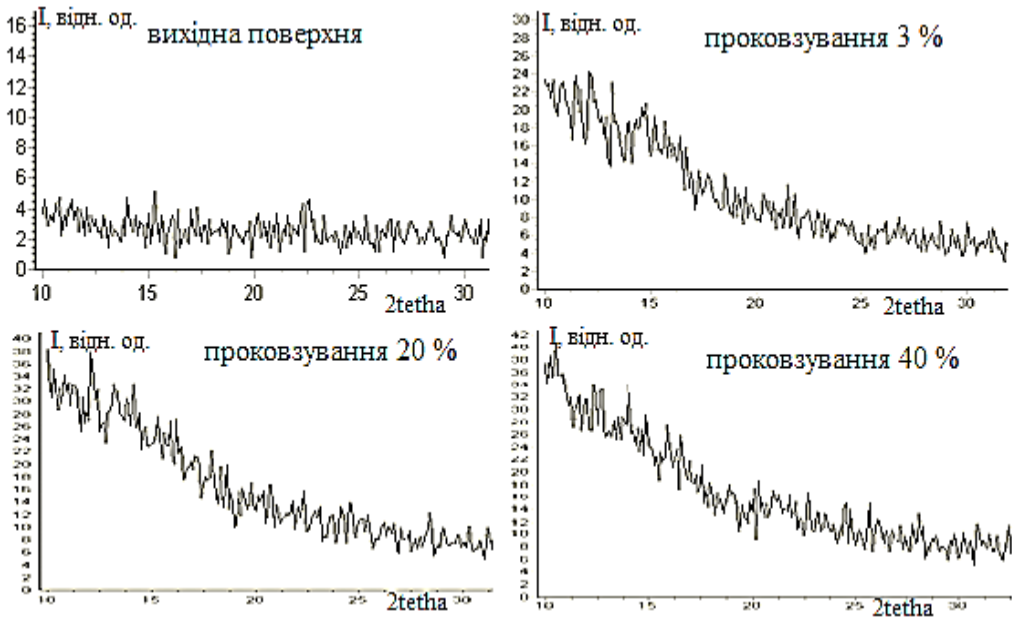


Рис. 5. Фрагменти дифрактограм поверхневих шарів сталі 45 на ділянці малих кутів

Глибина аморфізованого деформованого шару металу після травлення мікрошліфів (4%-ним спиртовим розчином азотної кислоти) відстаючої поверхні за умов роботи з проковзуванням 3, 20 і 40% становить відповідно 40 - 50 мкм, 30 - 40 мкм, 100 - 300 мкм. Слід зазначити, що найбільш високі протизношувальні властивості характерні для контактних поверхонь, що працюють в умовах кочення з проковзуванням 20%, для яких встановлено зменшення лінійного зносу як випереджаючої, так і відстаючої поверхонь, в середньому, на 30%, в порівнянні з досліджуваними зразками при проковзуванні 3 і 40% (рис. 6).

Таким чином, структурно-деформаційні зміни поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь безпосередньо впливають на їх зносостійкість.

Найбільш високі протизношувальні властивості досягаються при поєднанні наклепаної γ -фази з наклепаною α -фазою.

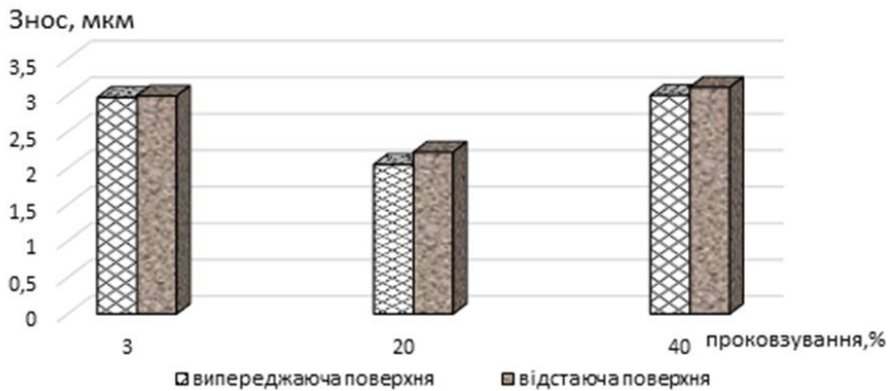


Рис.8. Лінійний знос контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням

Висновки. Проведений аналіз дифрактограм поверхневих шарів сталі 45 в умовах кочення з різним ступенем проковзування встановив реалізацію структурно-фазових перетворень при збільшенні ступеня проковзування, до яких відносяться дифузійні процеси, аморфізація приповерхневих шарів, утворення карбиду або аустеніту. При терті поверхневі шари металу збагачуються фазами, що характеризуються більш високою твердістю. Зазначені процеси відбуваються в результаті комбінованого впливу підвищеного тиску, направленої пластичної деформації, обумовленої дотичними напруженнями зсуву, і зростанням температури на ділянках фактичної площі дотику контактних поверхонь.

Список літератури

1. Шалобаев Е. В. Микросистемная техника и тенденции развития современной трибологии / Е. В. Шалобаев // Микросистемная техника. – 2003. – № 9. – С. 26-27.
2. Lu K. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment / K. Lu, J. Lu // Mater. Sci. and Eng. A. – 2004. – № 375-377. – P. 38-35.
3. Кузин Н. О. Выбор критерия при оценке параметров прочности функционально-градиентных конструкций / Н. О. Кузин, Б. А. Ляшенко, В. П. Ламашевский // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 6/1 (26). – С. 4-8.
4. Diskinso J. T. Nanotribology: rubbing on a small scale / J. T. Diskinso // J. Chem. Educ. – 2005. – Vol. 82, № 5. – P. 734-742.
5. Машков Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров: монография / Ю. К. Машков. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 240 с.
6. Повышение износостойкости узлов трения применением композиционных смазок с гетерогенной структурой / О. В. Лебедев, О. М. Пономарева, Р. Р. Хакимзянов, Г. К. Аннакулова [и др.] // Научн. журнал Братского гос. университета: Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 2. – С. 20-23.
7. Панин В. Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел / В. Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 6. – С. 5-23.
8. Влияние состояния поверхностного слоя на механизм пластического течения и сопротивление деформации малоуглеродистой стали / А. В. Панин, В. А. Клименов, Ю. И. Почивалов, А. А. Сон // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 4, № 4. – С. 85-92.

9. Механика пластической деформации и разрушения поверхностно упрочненных твердых тел в условиях трения / П. А. Витязь, В. Е. Панин, А. В. Белый, А. В. Колубаев // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 15-28.

10. Мікосянчик О. О. Автоматизований триботехнічний комплекс для оцінки змащувальних процесів в парах тертя / О. О. Мікосянчик, О. І. Запорожець, Р. Г. Мнацаканов // Проблеми трибології. – 2015. – № 4 (78). – С. 42-48.

11. Mordyuk V. M., Mikosyanchyk O.O. Influence of Shear Component of Load Under the Friction on a Structure–Phase State and Wear of Surface Layer of Steel 1045 / V. M. Mordyuk, O.O. Mikosyanchyk // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2017. - 39, No. 6. P. 795–813.

12. Детали машин: справочник. Т. 3 / под ред. Н. С. Ачеркана. – М.: Машиностроение. 1969. – 472 с.

13. Динамика интенсивности изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C60 / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куц // Полимерные композиты и трибология : междунар. науч.-техн. конф., 22-25 июня 2009 г., Гомель: тезисы докл. – Гомель: ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси, 2009. – С. 72.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2021.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – д. техн. наук, професор, професор кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net.

Токарук Віталій Володимирович – старший викладач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 56, E-mail: vetalion1980@gmail.com.

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, E-mail: mnatsakanov@ukr.net.

Занько Сергій Миколайович – канд. техн. наук, директор НДІ СЗПТІ, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 91, E-mail: snz707@ukr.net

Жосан Олександр Юрійович – студент групи КМ-303Б, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 408 44 45, E-mail: acelamond@gmail.com

O. A. MIKOSIANCHYK, V. V. TOKARUK, R. G. MNATSAKANOV,
S. M. ZANKO, O. Y. ZHOSAN

INFLUENCE OF THE DEFORMATION PROCESSES AND STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS ON THE WEARABILITY OF CONTACT

The analysis of diffractograms of metal surface layers under friction in the conditions of rolling with various degree of sliding has been carried out. The mechanisms of strengthening of contact surfaces as a result of their structural adaptation at friction have been considered. It has been identified that an increase in degree of sliding leads to intensification of diffusion processes, increase of temperature in the zone of frictional contact, increase of shear rate gradient, which supports the formation of carbide and austenitic phases, and amorphization of near-surface metal layers. The possibility of the phase transformations during friction including the formation of austenite due to secondary hardening is realized under conditions that include both local heating to temperatures above critical and cooling to room temperatures at high speed in areas of microcontact, and reduction of critical points under deformation. The formation of a fine structure under increasing slippage due to the localization of maximum shear stresses in the near-surface layers of the metal also facilitates structural transformations: the homogenization of austenite, dissolution and release of carbides, intense diffusion in microvolumes, etc. Herewith, the display lines (α -Fe) are shifted towards small angles, which mean an increase in lattice period, due to the dissolution of impurities in it (carbon, oxygen, nitrogen). The depth of the amorphous deformed metal layer of the lagging surface under conditions of slipping 3, 20 and 40% is respectively 40 - 50 μm , 30 - 40 μm and 100 - 300 μm . The influence of structural-deformation changes in surface and near-surface layers of contact surfaces on their wear resistance has been explored. The highest anti-wear properties are displayed in contact surfaces operating in rolling conditions with slipping of 20%, for which, on average, the reduction of linear wear of both leading and lagging surfaces by 30%, in comparison with the studied samples with slipping 3 and 40 %.

Key words: deformation hardening, plastic deformation, amorphization, slippage, wear.

Referenses

1. Shalobaev E. V. Mikrosistemnaja tehnika i tendencii razvitija sovremennoj tribologii / E. V. Shalobaev // Mikrosistemnaja tehnika. – 2003. – № 9. – S. 26-27.
2. Lu K. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment/ K. Lu, J. Lu // Mater. Sci. and Eng. A. – 2004. – № 375-377. – P. 38-35.
3. Kuzin N. O. Vybór kriterija pri ocnke parametrov prochnosti funkcional'no-gradientnyh konstrukcij / N. O. Kuzin, B. A. Ljashenko, V. P. Lamashevskij // Tehnologichnij audit ta rezervi virobnictva. – 2015. – № 6/1 (26). – S. 4-8.
4. Disckinso J. T. Nanotribology: rubbing on a small scale / J. T. Disckinso // J. Chem. Educ. – 2005. – Vol. 82, № 5. – P. 734-742.
5. Mashkov Ju. K. Tribofizika metallov i polimerov: monografija / Ju. K. Mashkov. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2013. – 240 s.
6. Povyshenie iznosostojkosti uzlov trenija primeneniem kompozicionnyh smazok s geterogennoj strukturoj / O. V. Lebedev, O. M. Ponomareva, R. R. Hakimzjanov, G. K. Annakulova [i dr.] // Nauchn. zhurnal Bratskogo gos. universiteta: Sistemy. Metody. Tehnologii. – 2009. – № 2. – S. 20-23.
7. Panin V. E. Fizicheskaja mezomehanika poverhnostnyh sloev tverdyh tel / V. E. Panin // Fizicheskaja mezomehanika. – 1999. – T. 2, № 6. – S. 5-23.
8. Vlijanie sostojanija poverhnostnogo sloja na mehanizm plasticheskogo techenija i soprotivlenie deformacii malouglerodistoj stali / A. V. Panin, V. A. Klimenov, Ju. I. Pochivalov, A. A. Son // Fizicheskaja mezomehanika. – 1999. – T. 4, № 4. – S. 85-92.

9. Mehanika plasticheskoj deformacii i razrushenija poverhnostno uprochnennyh tverdyh tel v uslovijah trenija / P. A. Vitjaz', V. E. Panin, A. V. Belyj, A. V. Kolubaev // Fizicheskaja mezomehanika. – 2002. – T. 5, № 1. – S. 15-28.

10. Mikosjanchik O. O. Avtomatizovaniy tribotekhnichnij kompleks dlja ocinki zmashhuval'nih procesiv v parah tertja / O. O. Mikosjanchik, O. I. Zaporozhec', R. G. Mnacakanov // Problemi tribologii. – 2015. – № 4 (78). – S. 42-48.

11. Mordjuk B. M., Mikosyanchyk O.O. Influence of Shear Component of Load Under the Friction on a Structure–Phase State and Wear of Surface Layer of Steel 1045 / B. M. Mordjuk, O.O. Mikosyanchyk // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2017. - 39, No. 6. P. 795–813.

12. Detali mashin: spravochnik. T. 3 / pod red. N. S. Acherkana. – M.: Mashinostroenie. 1969. – 472 s.

13. Dinamika intensivnosti iznashivaniya kontaktnyh poverhnostej pri ispol'zovanii dobavki fullerena S60 / M. F. Dmitrichenko, R. G. Mnacakanov, O. O. Mikosjanchik, O. I. Kushh // Polimernye kompozity i tribologija : mezhdunar. nauch.-tehn. konf., 22-25 iyunja 2009 g., Gomel': tezisy dokl. – Gomel': IMMS im. V. A. Belogo NAN Belarusi, 2009. – S. 72.